

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СЛОЯХ АНОДНО-ОКИСЛЕННОГО $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ СПЛАВА

А.Г. Новиков¹⁾, Н.М. Казючиц³⁾, А.Н. Ларсен²⁾, Дж.Л. Хансен²⁾, П.И. Гайдук¹⁾

¹⁾ Кафедра физической электроники БГУ, ул. Курчатова, 5, г. Минск, Беларусь
тел. 278-97-00; e-mail: nowikow@biz.by

²⁾ Институт физики и астрономии, Орхусский университет, DK-8000, Орхус, Дания
³⁾ Физический факультет БГУ, пр. Независимости, 2, г. Минск, Беларусь

Методами и просвечивающей электронной микроскопии исследованы анодно-окисленные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ – сплавов после их окисления, высокотемпературной обработки и облучения ионами He^+ (2 МэВ , 10^{15} – 10^{16} см^{-2}). Обнаружено, что спектры катодолюминесценции содержат две основные полосы, находящиеся в красном (~640–700 нм) и фиолетовом (~400–480 нм) диапазоне оптической области спектра. Относительная интенсивность полос зависит от режимов имплантации He^+ , а также от содержания Ge в окисленном слое. Полученные результаты обсуждаются в рамках механизма кислородно-обедненных центров с учетом стимулирующего влияния имплантационных дефектов и Ge-кластеров

Введение

Нанокристаллы (НК) непрямозонных полупроводников, таких как Si и Ge, исследуются в настоящее время очень широко, так как они открывают новые возможности в опто- и наноэлектронике, при сохранении совместимости с современной микроразностной технологией. В последние несколько лет много внимания уделялось сильной люминесценции в видимом диапазоне пористого Si [1], кристаллитов Si и Ge [2], полученных различными методами. В случае НК Ge большинство работ посвящено наноразмерным кластерам (аморфным или кристаллическим) внедренным в матрицу SiO_2 [3,4,5], интенсивный выход люминесценции в которых был получен в красной и сине-фиолетовой областях видимого диапазона.

В настоящей работе для увеличения выхода катодолюминесценции предложен и реализован новый подход, основанный на анодном окислении слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ сплава.

Методика эксперимента

В ходе настоящей работы использовали многослойные ($\text{Si}/\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/\text{Si}/\dots/\text{Si}$ -буфер) структуры, с толщиной слоев $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 5 нм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (001)-Si с использованием установки VG Semicon V80. Образцы выращенных структур подвергали анодному окислению (АО) при постоянной плотности тока 0.2 мА/см^2 до достижения $\Delta U = 25 \text{ В}$. Предполагалось, что при анодном окислении происходит субстехиометрический захват атомов Ge в слой SiO_2 с их последующим распадом в нанокластеры при термообработке. Для улучшения структурного качества анодного оксида и ускорения преципитации Ge проводилась последующая термообработка (ТО) при температуре $800 \text{ }^\circ\text{C}$ в течении 30–120 мин в атмосфере O_2 . Подготовленные таким образом структуры облучались ионами He^+ с энергией 2 МэВ до флюенсов $1.2 \cdot 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Элементный состав определяли из анализа спектров резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов He^+ (1.5 МэВ). Регистрацию спектров катодолюминесценции (КЛ) проводили при температуре 80 К с использованием решеточного монохроматора МДР-23 и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-100.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры КЛ, полученные от многослойной структуры $\text{SiO}_2(\text{Ge})/\text{Si}$ после АО и последующей ТО. Для сравнения, приведен спектр КЛ, полученный от анодно-окисленного слоя исходного Si. Обнаружено, что спектры КЛ содержат две основные полосы, находящиеся в красной (с макс. излучения 660 нм) и фиолетовой (~420 нм) области оптического диапазона. Из сравнения спектров КЛ видно, что на выход КЛ оказывает влияние как содержание Ge в образцах, так и термообработка. При наличии Ge в образцах в спектрах КЛ появляется полоса в фиолетовой области. Напротив, дополнительная ТО при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ сопровождалась перераспределением интенсивностей полос КЛ: увеличением красной составляющей спектра и подавлением фиолетовой.



Рис. 1 – Спектры КЛ, полученные от многослойной структуры $\text{SiO}_2(\text{Ge})/\text{Si}$. Для сравнения, приведен спектр КЛ, полученный от слоя SiO_2 без содержания Ge.

Интенсивная КЛ для чистого Si после АО в диапазоне длин волн $640\text{--}700 \text{ нм}$ в работах [5,6] связывают с наличием в SiO_2 "немоستيковых" атомов кислорода. Полоса в области $400\text{--}480 \text{ нм}$ на образцах АО SiO_2 отсутствует, что говорит о незначительной концентрации кислородных вакансий. Полоса КЛ в диапазоне длин волн $400\text{--}480 \text{ нм}$ проявляется в слоях SiO_2 , содержащих Ge. Анализ таких слоев с помощью POP (данные не приведены) показал, что при АО происходит захват атомов Ge в слой оксида. Равновесный предел растворимости Ge в SiO_2 составляет менее $0.1 \text{ ат.}\%$, следовательно, такие слои

являются пересыщенными. Поэтому можно предполагать, что в указанных слоях велика вероятность непосредственного взаимодействия атомов Ge между собой и образования, так называемых, кислородных моновакансий ($O \equiv Ge-Ge=O$), с которыми связывают интенсивную фиолетовую люминесценцию [6-8]. Большая ширина этой полосы (~ 100 нм) во многом обусловлена тем, что при вводе в слой оксида избыточной концентрации Ge увеличивается общая концентрация кислородных дефектов, образование которых облегчается благодаря меньшей энергии связи Ge-O по сравнению со связью Si-O.

Увеличение интенсивности полосы КЛ в красной области соответствует данным работ [7,9,10], в которых излучательную рекомбинацию связывают как с наличием квантовых эффектов в точках Ge, окруженных высоким потенциальным барьером SiO_2 , так и с возможной рекомбинацией дырок из нанокластера Ge и электронов на дефектных уровнях, обусловленных границей НК-Ge/ SiO_2 [8,9]. Распад $SiO_2(Ge)$ слоя после ТО лимитируется преимущественно диффузионными потоками атомов Ge к центрам преципитации. Однако, проведенные ПЭМ исследования (не показаны) не позволили сделать однозначный вывод о фазовом состоянии Ge в образцах после АО и ТО.

Представленные на рис. 2 спектры КЛ от образцов после АО и облучения He^+ демонстрируют изменение выхода КЛ в зависимости от дозы облучения. Зависимость имеет выраженный немонотонный характер. При облучении образцов ионами He^+ с минимальной дозой происходит одновременный рост интенсивности полос КЛ как в красной, так и в фиолетовой областях. Увеличение дозы до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ приводит сначала к дальнейшему росту выхода КЛ в области 400-480 нм, однако при дозе 10^{16} см^{-2} наблюдается гашение КЛ в красной области до уровня необлученного образца.

Известно, что ионное облучение за счет выбивания атомов из узлов может приводить как к усилению и значительному уширению (из-за увеличения плотности дефектов) всех полос КЛ, связанных с дефектами, так и к ее ослаблению при накоплении безызлучательных E' -центров. Учитывая, что дефекты, имеющие радиационную природу, такие как германиевые кислородно-обедненные центры и "немостиковые" атомы кислорода ответственны за выход соответственно в фиолетовой и красной областях, такой результат согласуется с работами [9,10]. Превышение порогового значения дозы приводит к гашению КЛ во

всей области спектра, что вероятно связано с накоплением безызлучательных E' -центров.

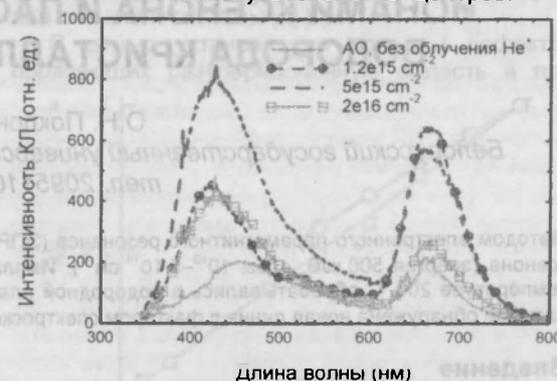


Рис. 2 - Дозовая зависимость выхода КЛ от многослойных структур $SiO_2(Ge)/Si$. После АО структуры облучались ионами He^+ с энергией 2 МэВ дозой $1.2 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16}$.

Заключение

Установлено, что интенсивность полос КЛ и их положение в спектре зависит от условий формирования многослойных структур $SiO_2/SiGe/Si$: типа и условий их оксидирования, присутствия атомов Ge в слое SiO_2 . Продемонстрировано влияние дозы облучения ионами He^+ . Зависимость имеет немонотонный характер, происходит как значительное увеличение интенсивности КЛ (в оптимальных условиях свечение различимо невооруженным глазом), так и гашение КЛ при дозе $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Список литературы

1. А.Ф. Лейер, Л.Н. Сафронов, Г.А. Качурин // ФТП, 1999, том 33, вып. 4.
2. L. Rebohle, J. von Borany, H. Frob, W. Skorupa // Appl. Phys. B 71, 131-151 (2000).
3. И.Е. Тысченко, Л. Реболе // ФТП, 2004, том 38, вып. 7.
4. H. Fukuda, S. Sakuma et. al. // J. Appl. Phys., 2001, v. 90, no. 7, p. 3524-3528.
5. A. V. Kolobov, S. Q. Wei, W. S. Yan et. al. // Phys. Rev. B 67, 195314 (2003).
6. M.A. Stevens Kalceff, M.R. Phillips // Phys. Rev. B. v. 52, no. 5, 3122-3134 (1995)
7. A.A. Shklyayev, Masakazu Ichikawa // Appl. Phys. Lett., v. 80, no. 8, 1432-1434 (2001)
8. О.Н. Горшков, Ю.А. Дудин и др. // ЖТФ, 2005, том 31, вып. 12.
9. Г.А. Качурин, Л. Реболе, И.Е. Тысченко и др. // ФТП, 2000, том 34, вып. 1.
10. W.S. Lee, J.Y. Jeong et. al. // Appl. Surf. Sc. 169 -170 (2001) 463-467

CATHODOLUMINESCENCE OF ANODICALLY OXIDIZED $Si_{1-x}Ge_x$ ALLOY LAYERS

A.G. Novikau¹, N.M. Kazuchits¹, A. Nylandsted Larsen², J. Lundsgaard Hansen² and P.I. Gaiduk¹

¹Belarusian State University, 4, prosp. Nezavisimosti, 220030, Minsk, Belarus

²Institute of Physics, University of Aarhus, DK-8000 Aarhus C, Denmark

In this work, a new approach has been proposed and developed to enhance luminescence efficiency using an anodic oxidation procedure of $Si_{1-x}Ge_x$ alloy layers. The cathodoluminescence (CL) spectra consist of two principal strong bands whose peak energies are in red region (~1.9 eV) and in a blue-violet region (~2.9 eV), respectively. The following possible reasons for intensive CL are discussed: (a) the Ge clusters incorporated in the oxide layer; and (b) defect-related luminescence.